



Centro Universitário de Brasília - UNICEUB
Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS
Curso: Engenharia Civil

LUAN RAFFAEL RODRIGUES DA CRUZ

ESTUDO COMPARATIVO DA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES COM RESÍDUOS MEDIANTE A UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE GEO5

Brasília
2019

LUAN RAFFAEL RODRIGUES DA CRUZ

**Estudo comparativo da estabilização de taludes com resíduos
mediante a utilização do software GEO5**

Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.^a Civil Ivonne Alejandra Maria Gutierrez Gongora, Dr^a.

Brasília
2019

LUAN RAFFAEL RODRIGUES DA CRUZ

**Estudo comparativo da estabilização de taludes com resíduos
mediante a utilização do software GEO5**

Trabalho de Curso apresentado como um
dos requisitos para a conclusão do curso
de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro
Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.^a Civil Ivonne Alejandra
Maria Gutierrez Gongora, Dr.^a.

Brasília, 02 de julho de 2019.

Banca Examinadora

Eng.^a. Civil: Ivonne Alejandra Maria Gutierrez Gongora, Dr.^a.
Orientadora

Eng.^a. Civil: Erika Regina Costa Castro, Msc.
Examinador Interno

Eng.^a. Civil: Claudia Maricela Gómez, Dr.^a.
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família, minha mãe Luciana Cristina Marinho Tavares e meu pai Almir Ferreira Tavares pelo apoio e suporte ao longo de todos esses anos dedicados ao curso.

À minha orientadora, Prof. Dr^a. Ivonne Alejandra Maria Gutierrez Góngora pela compreensão e por ser tão prestativa para a realização deste trabalho.

Ainda, a meus amigos Mateus Henrique Fonseca Souza e Leonardo Henrique Soares Coelho pela amizade e por me acompanharem desde o início dessa jornada.

Gostaria de agradecer ainda aos demais membros do corpo docente, especialmente àqueles responsáveis pelas áreas de conhecimento presentes neste trabalho.

RESUMO

Dada a importância da busca de práticas sustentáveis, especialmente no âmbito da Engenharia Civil, o trabalho a seguir tem o intuito de estudar a viabilidade da utilização de resíduos orgânicos quanto à estabilidade de taludes, sendo o objeto desse estudo as cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar incorporados a uma amostra de solo natural em percentuais de 5% e 4% respectivamente. O estudo foi realizado a partir da comparação do fator de segurança obtido em cada uma das análises subsequentes, onde foi observado os expressivos ganhos de resistência pelo talude quando empregadas as incorporações de solo com resíduos. Analisou-se também a interação entre o solo melhorado e com estruturas de contenção, onde observou-se que nesse cenário, a influência dessas estruturas teve pouco efeito para a estabilidade do talude, que já foi assegurada pelas características do solo melhorado. O estudo foi realizado com o auxílio do programa GEO5, com o objetivo de auxiliar na obtenção da superfície de ruptura mais desfavorável e através disso, discorrer as análises supracitadas. Com o estudo, constata-se que quanto a verificação da estabilidade de taludes, o material simulado atende as características sob a ótica dos esforços atuantes no maciço, acrescentando ganhos significativos no que diz respeito a sua resistência mecânica.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes. Melhoramento de solos. Utilização de resíduos.

ABSTRACT

Given the importance of the search for sustainable practices, especially in the scope of Civil Engineering, the following work is aimed at studying the feasibility of the use of organic residues as regards slope stability, the object of this study being the ashes of rice husk and sugarcane bagasse incorporated into a soil sample 5% and 4% respectively. The study was carried out by comparing the safety factor obtained in each of the subsequent analyses, where the significant slope resistance gains were observed when soil incorporations with residues were used. It was also analyzed the interaction between the improved soil and with containment structures, where it was observed that in this scenario, the influence of these structures had little effect for slope stability, which was already assured by improved soil characteristics. Also, the study was done with the help of the GEO5 program with the objective of assisting in obtaining the most unfavorable rupture surface and through this, to analyze the above-mentioned analyses. With the study, it is verified that regarding the verification of slope stability, the simulated material meets the characteristics from the perspective of the forces acting on the massif, adding significant gains with respect to its mechanical resistance.

Key words: Stability of slopes. Soil improvement. Use of waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de Fellenius - Forças aplicadas a uma fatia de solo	8
Figura 2 - Método de Bishop - Forças aplicadas a uma fatia de solo	9
Figura 3 - Método de Spencer - Forças aplicadas a uma fatia de solo	11
Figura 4 - Fator de segurança - Método de Spencer.....	12
Figura 5 - Elementos do tirante	15
Figura 6 - Características do tirante	16
Figura 7 - Constituição do grampo	17
Figura 8 - Corte do talude	19
Figura 9 - Disposição dos tirantes no talude	23
Figura 10 - Disposição dos grampos no talude	24
Figura 11 - Superfície de ruptura do talude (Solo natural)	25
Figura 12 - Superfície de ruptura (Solo + 5% CBC)	26
Figura 13 - Superfície de deslizamento (Solo + 4% CCA).....	26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Agentes e causas dos escorregamentos (Guidicini e Nieble,1984).....	4
Quadro 2 – Fatores deflagradores dos movimentos de massa segundo Varnes (1978)	5
Quadro 3 – Principais métodos de análise da estabilidade de taludes em solos	6
Quadro 4 – Principais métodos de análise da estabilidade de taludes em solos	6

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de análise do talude.....	18
Tabela 2 - Coordenadas do talude	19
Tabela 3- Especificações dos tirantes	23
Tabela 4 - Especificações dos grampos.....	24
Tabela 5 - Resultados detalhados (Solo natural)	27
Tabela 6 - Resultados detalhados (Solo + 5% CCA).....	27
Tabela 7 - Resultados detalhados (Solo + 4% CBC).....	28
Tabela 8 - Resumo dos resultados da análise (Sem contenção)	28
Tabela 9 - Resultados detalhados (Solo natural + Tirante)	29
Tabela 10 - Resultados detalhados (Solo + 5% CCA + Tirante)	29
Tabela 11 - Resultados detalhados (Solo + 4% CBC + Tirante)	30
Tabela 12 - Resumo dos resultados da análise (Tirantes)	30
Tabela 13 - Resultados detalhados (Solo natural + Grampos).....	31
Tabela 14 - Resultados detalhados (Solo + 5% CCA + Grampos).....	31
Tabela 15 - Resultados detalhados (Solo + 4% CCA + Grampos).....	32
Tabela 16 - Resumo dos resultados da análise (Solo Grampeado)	32

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do fator de segurança.....	7
Equação 2 – Fator de segurança pelo método de Fellenius	8
Equação 3 – Fator de segurança pelo método de Bishop.....	9
Equação 4 – Cálculo de Ma	10
Equação 5 – Cálculo da Resultante das forças de interação	11
Equação 6 – Fator de segurança pelo método de Spencer	11
Equação 7 – Fator de segurança pelo método de Spencer	11
Equação 8 – Fator de segurança pelo método de Spencer	12
Equação 9 – Fator de segurança pelo método de Spencer	12
Equação 10 – Fator de segurança pelo método de Spencer	12
Equação 11 – Fator de segurança pelo método de Spencer	12
Equação 12 – Teoria dos Estados Limite	21

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

b – largura da fatia [m]

c – coesão [kPa]

CBC – Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar;

CCA – Cinza da Casca do Arroz.

E – Força de interação normal aplicada na interface entre fatias (kN/m)

F_s – fator de segurança

γ – peso volúmico do solo [kN/m³]

h – altura da fatia [m]

l – comprimento da base da fatia [m]

N – Tensão normal mobilizada na base das fatias [kN/m]

Q – Resultante das forças de interação atuantes na fatia [kN/m]

W – Peso próprio da fatia [kN]

α – inclinação da base de uma fatia [°]

θ – inclinação da resultante das forças de interação [°]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 <i>Objetivo geral</i>	3
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2.3 <i>Justificativa</i>	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 <i>Estabilidade de taludes</i>	4
3.2 <i>Fator de segurança</i>	5
3.2.1 <i>Método de Fellenius</i>	7
3.2.2 <i>Método de Bishop</i>	9
3.2.3 <i>Método de Spencer</i>	10
3.3 <i>Solo reforçado</i>	13
3.4 <i>Estruturas de contenção</i>	13
3.4.1 <i>Cortina atirantada</i>	14
3.4.2 <i>Solo grampeado</i>	16
4. METODOLOGIA	18
4.1 <i>Escolha do talude</i>	18
4.2 <i>Escolha do método de estudo</i>	20
4.3 <i>Simulação no GEO5</i>	20
4.4 <i>Comparação</i>	22
4.4.1 <i>Com o solo natural</i>	22
4.4.2 <i>Com o uso de grampos e tirantes</i>	22
5. ANÁLISES E RESULTADOS	25
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
6.1 <i>Conclusões</i>	34

6.2 Sugestões para pesquisas futuras	35
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Tragédias envolvendo deslizamentos de terra vêm ocorrendo cada vez com mais frequência no Brasil, considerando que com a urbanização, o aumento da atividade econômica do país e o desflorestamento, são ocupadas áreas consideradas de risco e que precisam de monitoramento e inspeção.

A ser analisada a importância da estabilização de taludes no país, à luz de eventos históricos, surge a necessidade da adoção de métodos capazes de prover a segurança de encostas. Em especial, aquelas em regiões com potencial risco de fatalidades ou grandes prejuízos a atividades econômicas vitais para o desenvolvimento local.

Sob o aspecto geotécnico, um talude sofre ruptura em duas situações de maneira geral, quando a resistência ao cisalhamento é superada pelas tensões cisalhantes atuantes no maciço, ou quando essa é reduzida. As causas para a redução da resistência em maciços são diversas, podem ocorrer por processos geodinâmicos, geomorfológicos, hidrológicos e ambientais, portanto, é importante salientar que a resistência ao cisalhamento surge da interação entre as partículas do solo (Gerscovich, 2016), variando sensivelmente em função da mesma.

Para evitar que um talude rompa, costuma-se utilizar estruturas de contenção, como muros de arrimo e tirantes, de forma a combater o empuxo e assegurar a estabilidade ao mesmo. Todavia, quando se trata de maciços muito altos, o custo acaba por inviabilizar o emprego dessas técnicas, para tal, as soluções mais adequadas tornam-se o uso de solo reforçado (Ehrlich e Becker, 2009).

O solo reforçado é a incorporação de materiais resistentes à tração ao solo, atuando como muro de contenção, essa nova estrutura combate ao empuxo assegurando que o maciço se mantenha estável e coeso. Assim, surge a demanda por materiais capazes de desempenhar essa função, sendo hoje uma linha de pesquisa em ascensão no Brasil.

Os resíduos oriundos da indústria e de atividades agrícolas vem desempenhando um grande papel nesse sentido, sendo capazes de oferecer características desejadas ao serem processados e incorporados a materiais já

utilizados. Como é o caso da casca do arroz e do bagaço da cana-de-açúcar, ao serem analisados e preparados, foi constatado que ambos possuíam propriedades cimentíceas.

Em relação a ótica ambiental, a utilização de materiais não renováveis para a estabilização de taludes não só é nociva, por necessitar devastar uma grande área de jazida para a recolha dos materiais, como a prática extrativista impacta profundamente o meio ambiente. Desse modo, é importante buscar formas de reaproveitar materiais como os resíduos na construção civil.

Levando em consideração o anteriormente exposto, a proposta desse trabalho é realizar simulações via software GEO5 em taludes, com a utilização de dados de solo natural e com a incorporação de cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar. Para tal, serão utilizados os parâmetros de resistência do solo obtidos em laboratório de cada uma das situações, além de adotar uma geometria genérica com a intenção de comparar os resultados obtidos

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo comparativo entre um talude de geometria genérica com a utilização de solo convencional, e com solo melhorado com cinzas da casca do arroz e cinzas do bagaço da cana de açúcar.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a estabilidade dos taludes compostos por solo natural e com a incorporação de cinzas da casca do arroz e do bagaço da cana-de-açúcar;
- Comparar os coeficientes de segurança obtidos pelo software GEO5 em cada um dos cenários apontados;
- Analisar a necessidade e interação de métodos de contenção complementares a solução solo-cinza;
- Buscar a adoção em maior escala da incorporação de resíduos em taludes para destinar de forma sustentável os materiais tratados;

2.3 Justificativa

Trata-se de buscar aproveitar materiais residuais na estabilização de taludes, de maneira a destinar um material que seria então descartado. Assim, incentivando o uso de práticas sustentáveis para empreendimentos que já impactam de forma acentuada o meio ambiente, que são as obras envolvendo grandes movimentações de solo.

Especialmente considerando as propriedades dos resíduos estudados, onde são capazes de aumentar a resistência do solo ao serem incorporados, assegurando uma maior estabilidade aos taludes. De tal forma, o uso do software foi imprescindível para possibilitar esse estudo, onde o volume de dados analisados tornaria inviável qualquer discussão sobre o tema sem o acompanhamento de métodos computacionais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estabilidade de taludes

Para Queiroz (2009), o projeto e a execução de taludes e a estabilização das encostas se dão em função da análise das condições hidrostáticas, esforços internos e externos, características mecânicas das camadas envolvidas, geometria e limitações das escavações na área de ocupação da obra e, por fim, a determinação da inclinação do talude em função da economia e segurança.

Segundo Araya (2016) a estabilidade de taludes depende principalmente de três fatores, da geomorfologia, que engloba a topografia e a relação de continuidade nos estratos, das propriedades mecânicas do solo que compõe o maciço e de condições de fluxo dentro da encosta.

Segundo o Manual Técnico de Encostas GEO-RIO (1999, p. 11):

“De acordo com Fernandes e Amaral (1996), várias feições geológicas e geomorfológicas podem atuar como fatores de escorregamentos, determinando a localização espacial e temporal dos movimentos de massa nas condições de campo. ”

Ainda de acordo com o Manual, são descritos agentes causadores de instabilidade do maciço, conforme visto nos Quadros 1 e 2.

Quadro 1 – Agentes e causas dos escorregamentos (Guidicini e Nieble, 1984)

Agentes			Causas		
Predisponentes	Efetivos		Internas	Externas	Intermediárias
	Preparatórios	Imediatos			
Complexo geológico, complexo morfológico, complexo climato-hidrológico, gravidade, calor solar, tipo de vegetação.	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação da temperatura, dissolução química, ação de fontes mananciais, oscilação do freático, ação de animais e antrópica.	Chuvas intensas, fusão do gelo e neves, erosão, terremoto, ondas, vento, ação do homem.	Efeito das oscilações térmicas, redução dos parâmetros de resistência por intemperismo.	Mudanças na geometria do sistema, efeitos de vibrações, mudanças naturais na inclinação das camadas.	Elevação do nível piezométrico em massas "homogêneas", elevação da coluna de água em descontinuidades, rebaixamento rápido do lençol freático. Erosão subterrânea retrogressiva (piping), diminuição do efeito de coesão aparente.

Fonte: Manual técnico de encostas (GEO-RIO).

Quadro 2 - Fatores deflagradores dos movimentos de massa segundo Varnes (1978)

Ação	Fatores	Fenômenos geológicos/antrópicos
Aumento da solicitação	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão, escorregamentos Cortes
	Sobrecarga	Peso da água de chuva, neve, granizo, etc. Acúmulo natural de material (depósitos) Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas, congelamento, material expansivo
Redução da resistência	Características inerentes ao material (geometria, estruturas, etc.)	Características geomecânicas do material, tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo \Rightarrow redução na coesão, ângulo de atrito Elevação do N.A.

Fonte: Manual técnico de encostas (GEO-RIO).

3.2 Fator de segurança

Para efeitos deste trabalho, vale definir fator ou coeficiente de segurança que é a relação entre esforços solicitantes e resistentes. Este fator possui grande importância para a Engenharia Civil pois estabelece critérios para elaboração de projetos.

Segundo Queiroz (2009), o cálculo da estabilidade dos taludes é realizado através da análise dos esforços atuantes e os esforços resistentes no interior do maciço do talude. Existem diversos métodos de análise da estabilidade de taludes presentes na literatura técnica, contudo este trabalho se baseará em três tipos: Método de Bishop, método de Fellenius e método de Spencer. Ainda, conforme o Manual Técnico de Encostas (GEO-RIO), são descritos os métodos de análise conforme visto nos Quadros 3 e 4.

Quadro 3 - Principais métodos de análise da estabilidade de taludes em solo (*continua*)

Método	Superfície	Considerações	Vantagens	Limitações	Fator de Segurança	Aplicação
Taylor (1948) (figura 1)	circular	Método do círculo de atrito. Análise em termos de tensões totais. Taludes homogêneos.	Método simples, com cálculos manuais.	Aplicado somente para algumas condições geométricas indicadas nos ábacos.	Determinação do valor da altura crítica H_c $H_c = N_c \frac{c}{\gamma}$ $FS = \frac{H_c}{H}$	Estudos preliminares. Pouco usado na prática.
Talude infinito (figura 2)	plana	Estabilidade global representada pela estabilidade de um fatia vertical.	Método simples, com cálculos manuais.	Aplicado somente para taludes com altura infinita em relação à profundidade da superfície de ruptura.	$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot z} \cdot B + \left(\frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \right) A$ $B = \sec \alpha \cdot \text{cosec } \alpha$ $A = (1 - r_u \cdot \sec^2 \alpha)$ $r_u = \frac{u}{\gamma \cdot z}$	Escorregamentos longos, com pequena espessura da massa instável; por exemplo, uma camada fina de solo sobre o embasamento rochoso.
Método das cunhas (figura 3)	superfície poligonal	Equilíbrio isolado de cada cunha, compatibilizando-se as forças de contato entre cunhas.	Resolução analítica ou gráfica, com cálculos manuais.	Considera cunhas rígidas. O resultado é sensível ao ângulo (δ) de inclinação das forças de contato entre as cunhas.	Determinação gráfica dos erros em polígonos de força para fatores F arbitrados. Cálculo de FS por interpolação para erro nulo.	Materiais estratificados, com falhas ou juntas.
Bishop simplificado (1955) (figura 4)	circular	Considera o equilíbrio de forças e momentos entre as fatias. Resultante das forças verticais entre fatias é nula.	Método simples, com cálculos manuais ou em computador. Resultados conservativos.	Método iterativo. Aplicação imprecisa para solos estratificados.	$F = \frac{1}{\sum W \sec \alpha} \frac{\sum [c' b + (W - ub) \tan \phi']}{m_a}$ $m_a = \cos \alpha \cdot \left[1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi'}{F} \right]$	Método muito usado na prática. O método simplificado é recomendado para projetos simples.
Bishop e Morgenstern (1960)	circular	Aplica o método simplificado de Bishop.	Facilidade de uso.	Limitado a solos homogêneos e taludes superiores a 27°	Retirado diretamente de ábacos.	Para estudos preliminares em projetos simples de taludes homogêneos.

Fonte: Manual técnico de encostas (GEO-RIO)

Quadro 4 - Principais métodos de análise de estabilidade de taludes em solos (*continuação*)

Hoek e Bray (1981)	circular	Massa instável considerada como um corpo rígido. Solução pelo limite inferior.	Uso simples. Taludes inclinados de 10° a 90°.	Para materiais homogêneos, com 5 condições específicas de nível freático no talude.	Retirado diretamente de ábacos	Para estudos preliminares, com riscos reduzidos de escorregamento.
Janbu (1972)	não circular	Satisfaz o equilíbrio de forças e momentos em cada fatia, porém despreza as forças verticais entre as fatias.	Superfícies de ruptura realísticas. Implementação simples em computadores.	Aplicado para solos homogêneos. Pode subestimar o fator de segurança. O método generalizado não tem esta limitação.	Pode ser calculado manualmente, com o auxílio de ábacos, ou por programas de computador.	Grande utilização prática. Devem ser consideradas as limitações das rotinas de cálculo.
Morgenstern e Price (1965)	não circular	Satisfaz todas as condições de equilíbrio estático. Resolve o equilíbrio geral do sistema. É um método rigoroso.	Considerações mais precisas que no método de Janbu.	Não é um método simples. Exige cálculos em computador.	Calculado por interações, com o uso de computadores	Para estudos ou análises detalhadas (retroanálises).
Sarma (1973, 1979)	não circular	Método rigoroso, atende as condições de equilíbrio. Considera forças sísmicas (terremotos).	Redução no tempo de cálculo, sem perda de precisão.	Método exige cálculos em computador. O método de Sarma (1973) pode ser resolvido manualmente.	Calculado por interações, com o uso de computadores.	É aplicado como uma alternativa ao método de Morgenstern e Price

Fonte: Manual técnico de encostas (GEO-RIO)

De maneira geral, a análise da estabilidade dos taludes se verifica conforme visto na Equação 1.

$$FS = \frac{\text{esforços atuantes}}{\text{esforços resistentes}} \quad (1)$$

Onde:

FS = 1,0 (talude em equilíbrio-limite)

FS > 1,0 (talude estável)

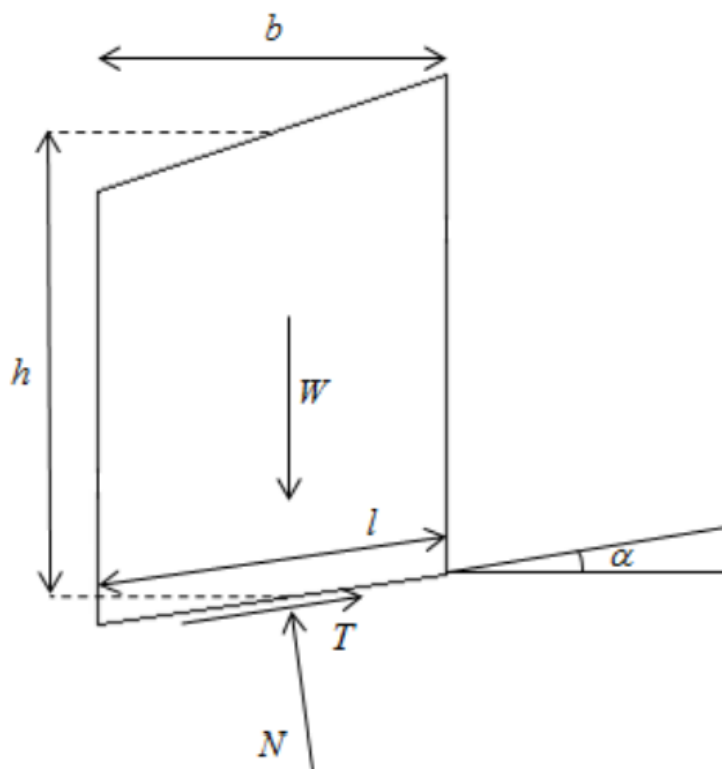
FS < 1,0 (talude instável)

3.2.1 Método de Fellenius

Denominado também de Método das Lamelas, foi proposto no início do século XX após o estudo de escorregamentos em cortes ferroviários e em portos na Suécia pelo professor Wolmar Fellenius.

Considera-se uma linha de ruptura circular, e subdivide o corpo livre em uma série de lamelas verticais de largura (b) aproximadamente igual. Essa disposição pode ser vista na Figura 1.

Figura 1 - Método de Fellenius - Forças aplicadas a uma fatia de solo



Fonte: Ferreira (2012)

O método é iterativo, ou seja, devem-se calcular várias superfícies de ruptura para buscar analisar a situação de estabilidade mais desfavorável do talude. A seguir, a Equação 2 para a obtenção do fator de segurança para análise pelo método de Fellenius:

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha} \sum_i [c_i \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \cdot \tan \phi_i] \quad (2)$$

Onde:

u_i - empuxo atuante no bloco

c_i, ϕ_i - valores efetivos dos parâmetros do solo

W_i - peso do bloco

N_i - força normal atuante no segmento da superfície de deslizamento

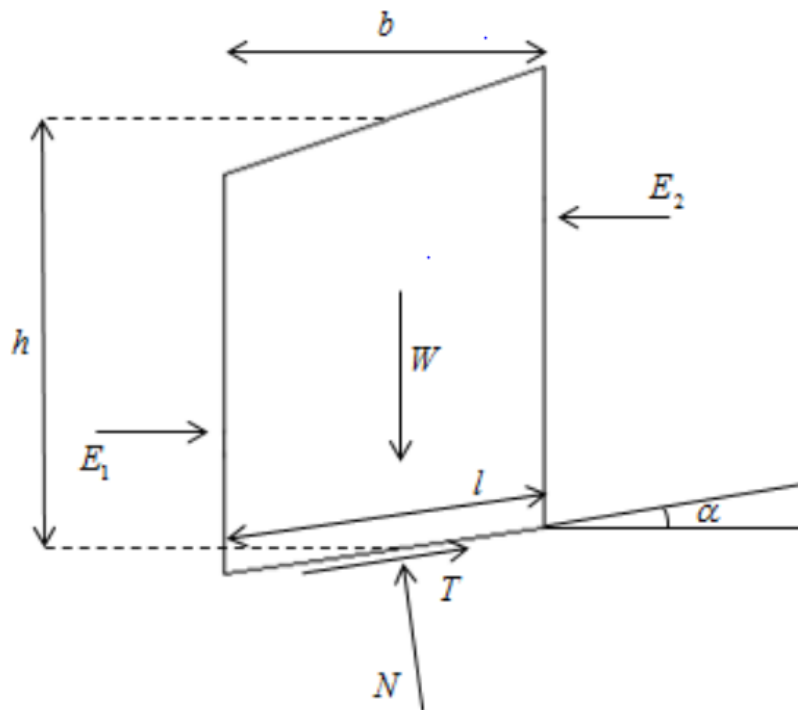
α_i - inclinação do segmento da superfície de deslizamento

l_i - comprimento do segmento da superfície de deslizamento

3.2.2 Método de Bishop

Método de Bishop ou método de Bishop simplificado, foi proposto por A. W. Bishop em 1955, considerando a superfície de ruptura cilíndrica e divide o corpo livre em lamelas. De maneira geral, considera também os esforços laterais entre as lamelas, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Método de Bishop - Forças aplicadas a uma fatia de solo



Fonte: Ferreira (2012)

A principal diferença entre o método de Bishop e o de Fellenius é que o primeiro analisa não somente o equilíbrio de momentos resistentes e atuantes, mas também o equilíbrio dos esforços que agem em cada lamela. No método de Bishop, o fator de segurança pode ser encontrado através da Equação 3, considerando o M_a obtido pela Equação 4.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{c.B + (P - \mu L).tg\phi}{M_a}}{\sum_{i=1}^n P.sen\alpha} \quad (3)$$

Sendo:

$$Ma = \left(1 + \frac{tg\alpha.tg\phi}{FS}\right).cos\alpha \quad (4)$$

Segundo Queiroz (2009, p. 105):

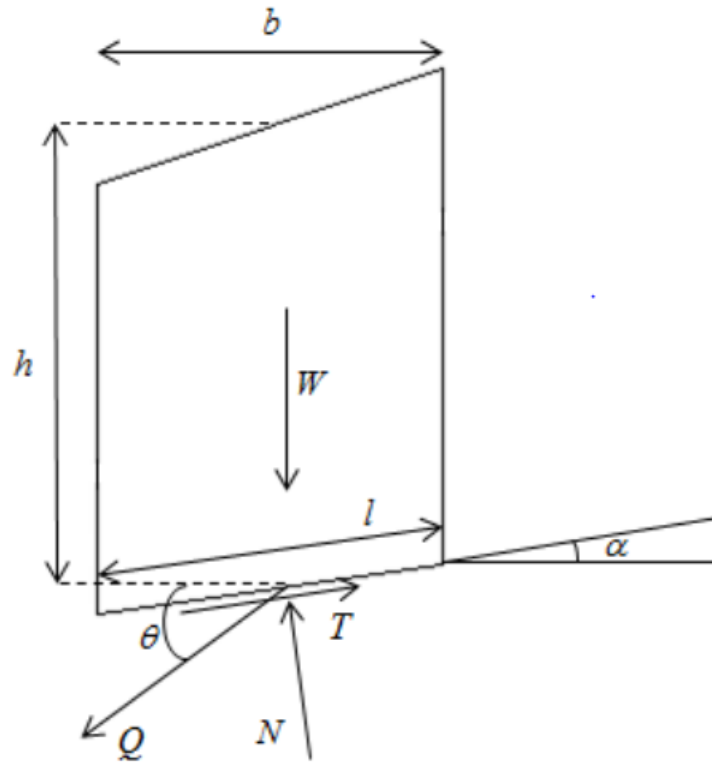
“A expressão de Ma depende de FS. Para processar a análise deve-se atribuir inicialmente um valor arbitrado a FS para o cálculo de Ma, que resulta geralmente em um valor calculado de FS diferente do arbitrado. Com esse novo valor calcula-se Ma, e assim sucessivamente, até se obter o valor final de S igual ao arbitrado.”

3.2.3 Método de Spencer

Apresentado em 1967, o método de Spencer é considerado sendo uma metodologia rigorosa que é capaz de satisfazer todas as equações de equilíbrio, tanto de forças como de momentos.

Segundo Silva (2011) as forças de interação entre fatias são representadas por uma resultante Q que assume uma inclinação constante T com a horizontal, conforme visto na figura 4. Ainda segundo o referido autor, Spencer entendeu válida a hipótese de o rácio entre forças de corte (X) e forças normais (E) ser constante. As considerações do autor podem ser observadas conforme a Figura 3.

Figura 3 - Método de Spencer - Forças aplicadas a uma fatia de solo



Fonte: Ferreira (2012)

Essa resultante é aplicada na base da fatia e no ponto intermédio dela. A reação normal N é obtida pelo equilíbrio de forças na direção paralela e perpendicular à base das fatias. O fator de segurança pode ser obtido por duas formas: somatório de momentos em relação a um ponto ou somatório de forças na direção horizontal ou paralela à base das fatias. Ao impor equilíbrio de forças nas direções normal e paralela à base da lamela, além de considerar o critério de ruptura de Mohr-Coulumb, obtêm-se a Equação 5.

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot l}{FS} + \frac{(W \cdot \cos \alpha - u \cdot l) \cdot \tan \phi'}{FS} - W \cdot \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \cdot \left(1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan(\alpha - \theta)}{FS}\right)} \quad (5)$$

Além disso, supondo que não existem forças externas atuando no talude, tanto a componente horizontal como vertical da força Q devem ser nulas. Portanto, o resultado dessas considerações são as Equações 6 e 7.

$$\sum Q \cdot \cos \delta = 0 \quad (6)$$

$$\sum Q \cdot \sin \delta = 0 \quad (7)$$

Como demonstrado que a soma dos momentos das forças externas em relação ao centro da rotação é zero, pode-se afirmar que a soma dos momentos oriundos das forças entre as fatias em relação ao mesmo centro é nula (Equação 8). Dessa forma:

$$\sum Q \cdot R \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (8)$$

Sendo a superfície circular e o valor de R, constante, obtém-se as expressões a seguir (Equações 9 e 10):

$$R \cdot \sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (9)$$

Logo:

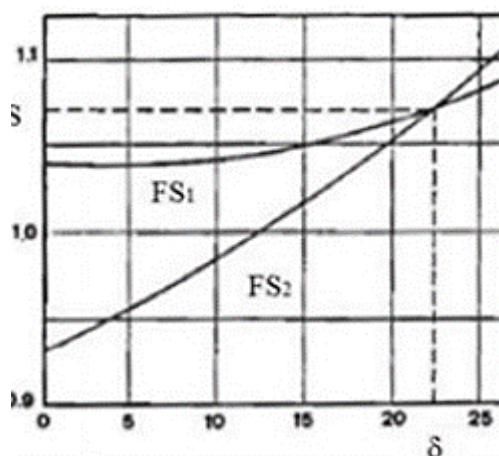
$$\sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (10)$$

De modo a tornar o sistema de equações determinável, Spencer considerou a Hipótese de δ constante para todas as fatias (Equação 11). Assim, as Equações 6 e 9 são reduzidas a:

$$\sum Q = 0 \quad (11)$$

Com isso é possível obter o fator de segurança de maneira gráfica (Figura 4). Plota-se um gráfico com os fatores de segurança obtidos pelas Equações 8 e 9 ao variar o ângulo δ . E onde essas duas funções se interceptarem é obtido um fator de segurança capaz de satisfazer ambas as equações.

Figura 4 - Fator de segurança - Método de Spencer



Fonte: Teixeira (2017)

3.3 Solo reforçado

Melhoria ou reforço de solos englobam a utilização de processos físicos e/ou químicos, tendo em vista a melhoria das propriedades mecânicas do solo. Segundo Specht (2000) esse processo busca através de algum procedimento o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade.

Ainda segundo o autor, de forma geral, associa-se o termo “melhoria” de solos ao tratamento através de processos físicos e/ou químicos: adição de cimento ou cal. Já o termo “reforço” está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes.

Segundo Van Impe (1989), estabilização de solos é o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência as cargas ou à erosão, através da compactação, da correção da granulometria e da sua plasticidade, ou ainda da adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação de suas partículas.

Considerando o emprego desse tipo de solução, FOOSE et al. (1996) discorre sobre a possibilidade do emprego de materiais recicláveis e resíduos em formato fibroso, tendo em vista a necessidade da busca de materiais mais sustentáveis para o mercado da construção civil. Essas fibras podem ser divididas em quatro grupos: naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

Conforme Vendruscolo (2003), os fatores que afetam o comportamento do compósito solo-fibra são complexos devido a inúmera quantidade de combinações de variáveis que alteram de forma significativa os mecanismos de interação.

Ainda segundo o autor, o melhoramento das propriedades dos solos reforçados com fibras depende dos parâmetros dessas fibras, dos parâmetros do solo, da tensão de confinamento e do modo de carregamento.

3.4 Estruturas de contenção

Neste capítulo serão apresentadas as soluções para a estabilização de encostas que serão empregadas nesse trabalho. Sendo elas: cortina atirantada e solo grampeado.

Estruturas de contenção são executadas com o intuito de impedir os deslocamentos do maciço que está em contato com a estrutura. Ranzini e Negro Junior (1998) definem essas estruturas como aquelas destinadas a contrapor-se a empuxos ou tensões geradas pelo maciço em que a condição de equilíbrio foi modificada por algum tipo de escavação, seja de corte ou aterro.

Importante salientar que a escolha da estrutura de contenção a ser utilizada não depende apenas de fatores técnicos ou econômicos, mas também de fatores externos, como por exemplo, no uso de tirantes, deve haver a aprovação dos vizinhos para a execução dos mesmos. Com isso, em alguns casos a solução mais adequada técnica e economicamente não pode ser adotada.

Sendo os aspectos técnicos a escolha do método de estabilização do talude depende de alguns fatores, como: características do solo, condições do nível da água, o espaço do terreno para sua implantação e condições das construções vizinhas.

3.4.1 Cortina atirantada

Conforme More (2003), para uma cortina atirantada a atuação dos tirantes deve ser de equilibrar as forças horizontais geradas pela pressão do contato entre solo e estrutura. Ainda segundo More (2003, p. 28):

“Os tirantes podem ser classificados como ativos ou passivos. Tirantes ativos são aqueles que estão permanentemente sob carga, independentes dos esforços atuantes no solo ou na estrutura de contenção [...]. Em contraste, nos tirantes passivos a carga só começa a atuar quando o maciço de solo ou a estrutura o solicitar, reagindo aos esforços produzidos nos mesmos. Na prática, os tirantes são raramente passivos. ”

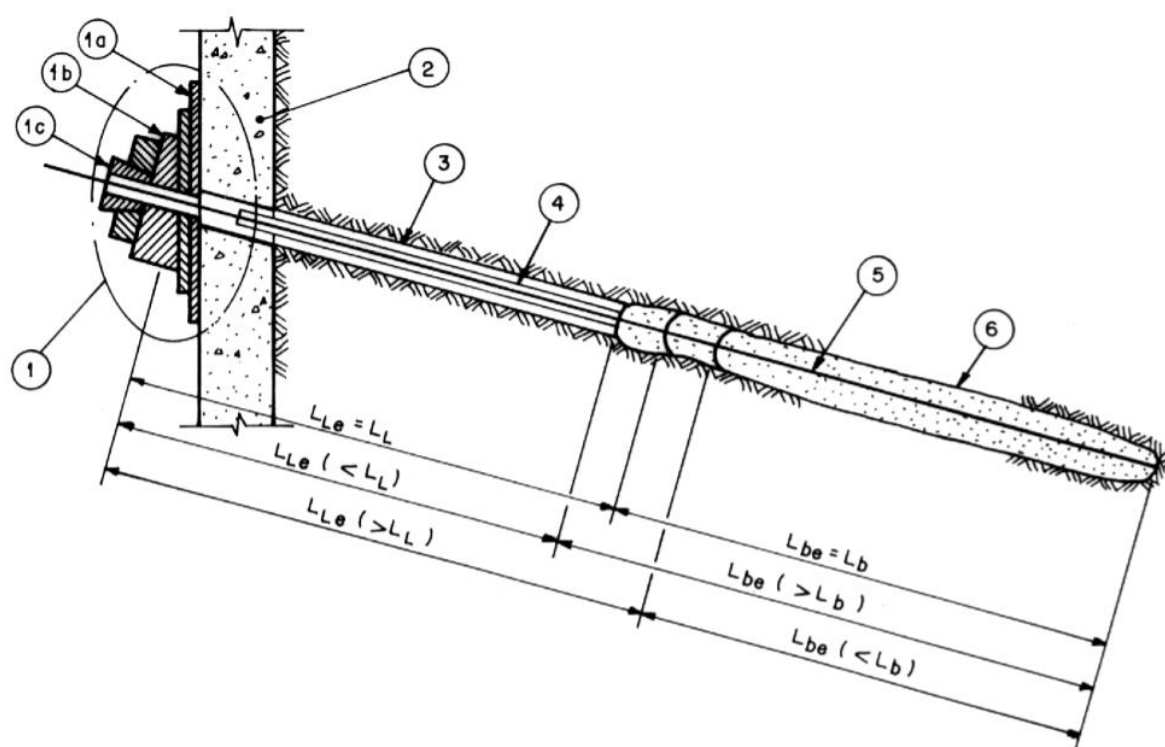
Para Matos (1990), o ideal seria que a instalação dos tirantes fosse realizada na horizontal. Todavia, problemas com a introdução da calda de cimento e a execução dos furos tornam difícil a instalação de tirantes com inclinação menor que 10° com a horizontal. Ainda, existem casos onde devido a presença de obras vizinhas ou devido ao fato de a camada de solo resistente estar muito abaixo da cabeça do tirante, que a inclinação do tirante é 30°.

Apesar do anteriormente exposto, é importante salientar que o projeto e execução de tirantes para estabilização de taludes devem ser corroboradas pela

ABNT NBR 5629: Execução de tirantes ancorados no terreno. Norma esta que fixa as condições exigíveis para o ancoramento de tirantes ao maciço, sejam provisórios ou permanentes.

O tirante é dividido em três partes principais (Figura 5): cabeça do tirante, trecho ancorado e trecho livre.

Figura 5 - Elementos do tirante

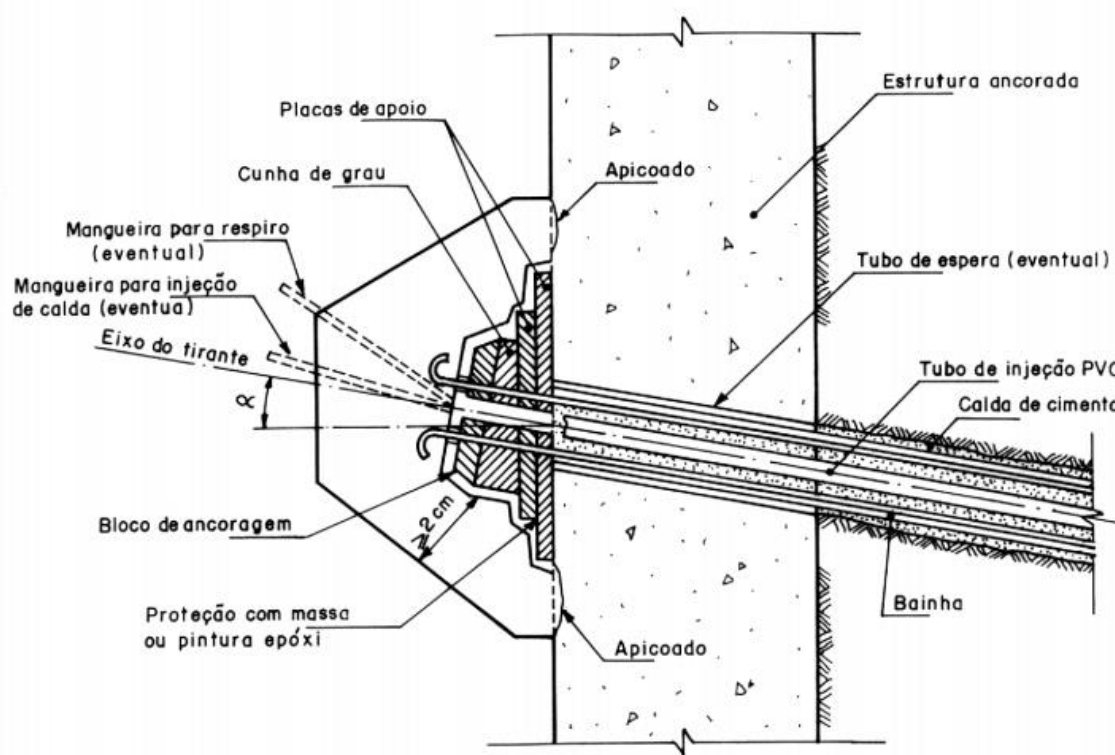


- | | |
|--|---------------------------|
| 1 - Cabeça | 3 - Perfuração do terreno |
| 1a - Placas de apoio (uma ou mais chapas, groute, etc.) | 4 - Bainha |
| 1b - Cunha de grau (metálica, groute ou concreto armado) | 5 - Aço, fibra, etc. |
| 1c - Bloco de ancoragem (parafuso, cunha, etc.) | 6 - Bulbo de ancoragem |
| 2 - Estrutura ancorada | |

Fonte: ABNT NBR 5629 (Anexo A)

Ainda, a figura 6 traz o detalhamento contido no realce da figura anterior:

Figura 6 - Características do tirante



Fonte ABNT NBR 5629 (Anexo A)

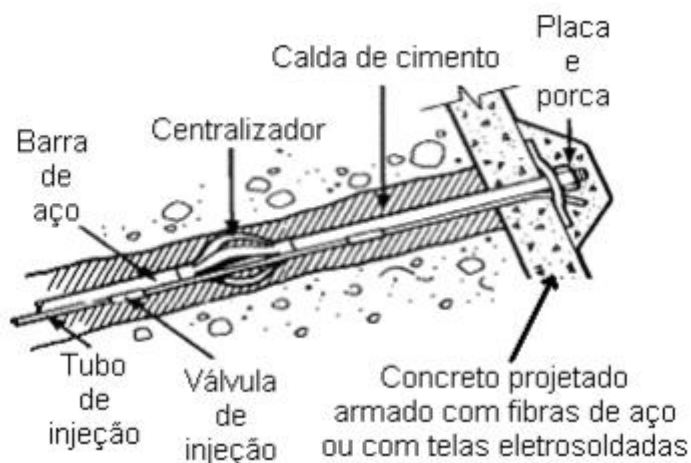
3.4.2 Solo grampeado

O solo grampeado é uma técnica de estabilização de taludes que resulta na melhoria da parte arrimada, é aplicado em taludes em corte, ou já cortados com o objetivo de reforçar o maciço. Esta melhoria compreende a execução do chumbador e do concreto projetado, este combatendo a instabilidade local da face e aquele estabilizando o maciço.

Segundo Nascimento e Sampaio (2007) a técnica apresenta vantagens econômicas seja no escoramento de escavações como também para a estabilização de taludes. Ainda, sua disseminação se deve a facilidade no transporte dos equipamentos empregados para a técnica, o que reduz o custo comparado com outras técnicas de estabilização.

O elemento que trata o solo é o chumbador, este é constituído por uma barra metálica, centralizadores e mangueiras de injeção, o grampo é constituído conforme a Figura 7.

Figura 7 - Constituição do grampo



Fonte: Adaptado de ABMS/ABEF (1999)

Pode-se dizer que a técnica tem tido boa aceitação no mercado, além disso, com sua evolução, a experiência na execução e nos bons resultados é possível reduzir o comprimento total de grampos em relação aos primeiros projetos executados no Brasil por volta da década de 70.

4 METODOLOGIA

4.1 Escolha do talude

Para o estudo, foi escolhida uma geometria de talude genérica, além dos parâmetros do solo em três cenários: solo natural, solo incorporado com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e solo incorporado com cinzas da casca do arroz.

Os parâmetros do solo foram coletados mediante análises prévias de Lobato (2018) e Santos (2018) após a realização de ensaios de caracterização das amostras e resistência do material, esses parâmetros foram organizados na Tabela 1.

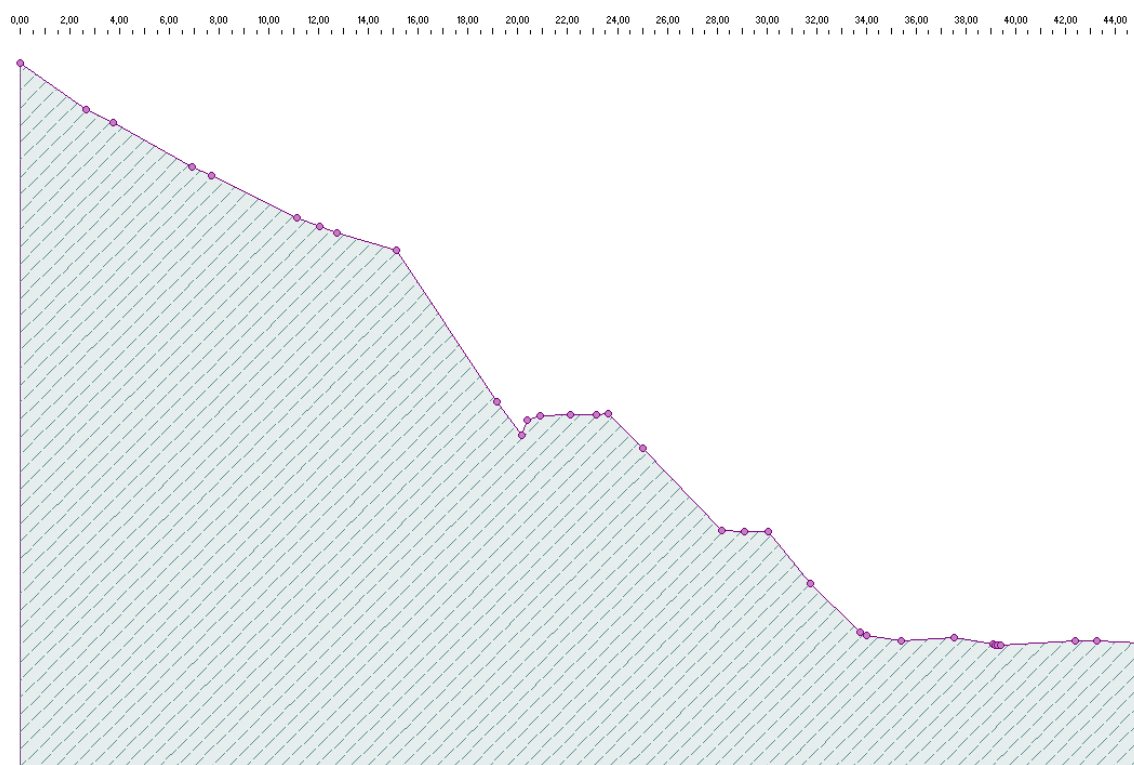
Tabela 1 - Parâmetros de análise do talude

Parâmetros do talude			
	Peso volúmico (kN/m ³)	Ângulo de atrito interno (graus)	Coesão do solo (kPa)
Solo natural	14,26	38	1,6
Solo + 5% CCA	13,88	26	44,4
Solo + 4% CBC	14,89	41	87,03

Fonte: Adaptado de Lobato (2018) e Santos (2018)

A representação do corte do talude foi obtida através da inserção de uma geometria de talude genérica no software GEO5 como interface, com esta, foram realizadas todas as análises que são dispostas no decorrer do trabalho. A seguir, são apresentados dados referentes a geometria do talude a ser analisado, como o corte do talude (Figura 8) e as coordenadas (Tabela 2).

Figura 8 - Corte do talude



Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 2 - Coordenadas do talude

Geometria do Talude - Coordenadas		
Nº	X	Z
1	0	23,38
2	2,64	21,5
3	3,74	21,01
4	6,9	19,21
5	7,66	18,87
6	11,12	17,18
7	12,02	16,82
8	12,73	16,57
9	15,1	15,86
10	19,14	9,78
11	20,15	8,42
12	20,36	9,05
13	20,9	9,2
14	22,1	9,25
15	23,15	9,27
16	23,63	9,28

17	25,04	7,9
18	28,19	4,61
19	29,12	4,56
20	30,06	4,55
21	31,75	2,47
22	33,75	0,5
23	34,02	0,41
24	35,42	0,19
25	37,55	0,32
26	39,09	0,03
27	39,19	0
28	39,26	0
29	39,4	0,01
30	42,4	0,17
31	43,28	0,17
32	45	0,07

Fonte: Próprio autor, 2019

Todavia, é importante salientar que essa é uma análise para estudar o comportamento das adições ao solo sob a ótica da estabilidade de taludes, não necessariamente representando um cenário prático real e sim um caso hipotético.

4.2 Escolha do método de estudo

Na análise, foram empregadas as metodologias de Fellenius, Bishop e Spencer visando comparar os fatores de segurança obtidos em cada um dos cenários e em cada método. Para tal, foi utilizado o software GEO5.

O intuito da análise é comparar os fatores de segurança dos diferentes cenários apresentados anteriormente e discorrer sobre a estabilidade de taludes de maneira geral, daí a escolha dos referidos métodos de análise. Sendo considerados como métodos mais comumente utilizados para o estudo da estabilidade de maciços.

4.3 Simulação no GEO5

Foi utilizado o módulo Estabilidade de Taludes, do software GEO5 para a verificação quanto a estabilidade da encosta com os dados apresentados

anteriormente neste capítulo. A verificação foi realizada através do fator de segurança obtido de acordo com a Teoria dos Estados Limite:

$$\frac{M_p}{M_a} > SF_s \quad (6)$$

Onde:

- M_a : Momento desestabilizador
- M_p : Momento resistente
- SF_s : Fator de segurança

O uso do GEO5 permite que a análise se dê pelo cenário mais desfavorável através da simulação de superfícies de ruptura diversas, observado a situação última, ou seja o rompimento do maciço. A obtenção do cenário mais desfavorável se dá ao optar pela otimização quanto ao tipo de análise.

Em um primeiro momento foi realizada a análise considerando um talude composto por apenas um tipo de solo, não saturado e sem considerar qualquer tipo de estrutura de contenção e sobrecargas aplicadas sobre a crista do talude, assim obtendo o fator de segurança daquele tipo de solo estudado para a dada situação.

Importante destacar também que as análises foram feitas separadamente, para que pudessem ser feitas de forma detalhada e que possibilitassem a obtenção da superfície última de ruptura conforme abordado anteriormente.

Em outro momento, foram consideradas estruturas de contenção com o objetivo de avaliar a interação entre a mesma e as incorporações agregadas ao solo, porém ainda considerando um corpo não saturado e mesmos parâmetros apresentados.

Importante reiterar que os dados obtidos para essa análise são oriundos de outros trabalhos de caracterização dessas soluções. Tendo em comum o tipo de solo a ser empregado como amostra, que neste trabalho é referenciado como solo natural.

4.4 Comparação.

4.4.1 Com o solo natural

Levando em consideração o objetivo desse trabalho, com os dados apresentados anteriormente no presente capítulo, foi realizada a comparação da estabilidade de um talude de geometria genérica com a incorporação de cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar tendo o solo natural como referência.

Essa comparação se dá através dos valores obtidos do fator de segurança para cada solo inserido no programa e para cada metodologia abordada. Além disso, serão consideradas as forças ativas e passivas, os momentos de deslizamento e resistentes.

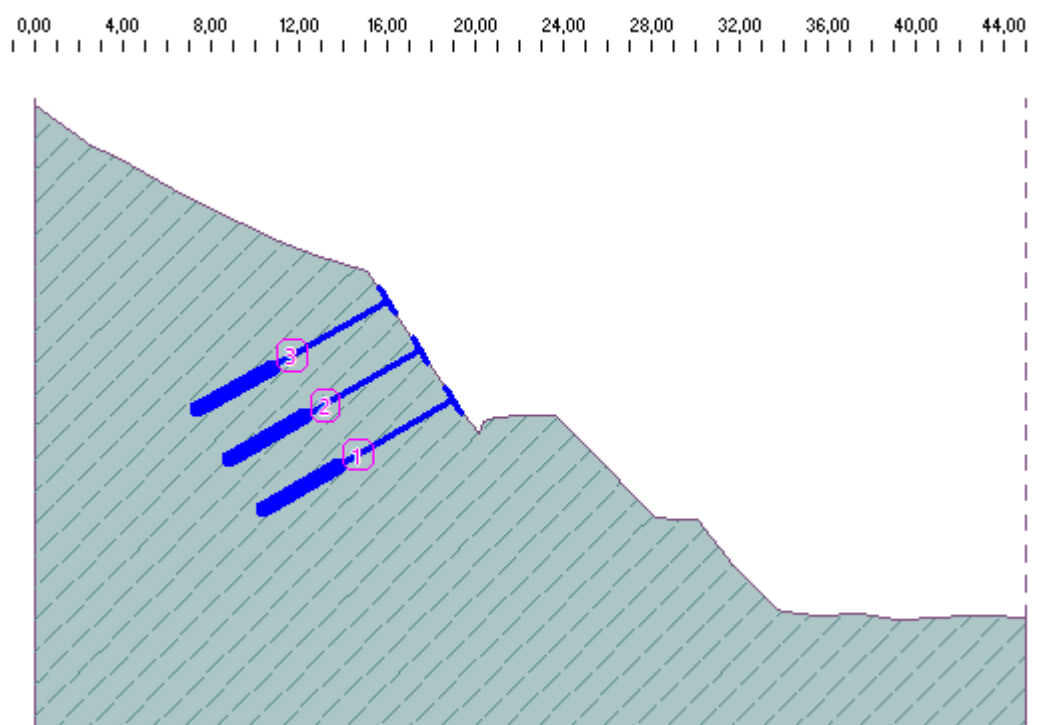
4.4.2 Com o uso de grampos e tirantes

Serão considerados dois tipos de estrutura de contenção: cortina atirantada e solo grampeado, onde foram simuladas para cada uma das duas condições de solo abordadas anteriormente ao longo da metodologia.

A escolha das estruturas de contenção se deve a serem soluções já empregadas no Brasil especialmente em obras rodoviárias onde são necessárias a estabilização de encostas para garantir a segurança dos usuários e preservação do patrimônio público e privado.

Para essa análise algumas considerações devem ser feitas previamente, como as características empregadas pelos tirantes e pelos grampos inseridos no talude. Importante dizer que foram respeitados os limites de espaçamento entre as peças e o ângulo recomendado para a inserção dos tirantes e grampos dentro do maciço, com o objetivo de obter um cenário mais próximo do prático. Essas considerações podem ser observadas a seguir nas Figuras 9 e 10, assim como nas Tabelas 3 e 4.

Figura 9 - Disposição dos tirantes no talude



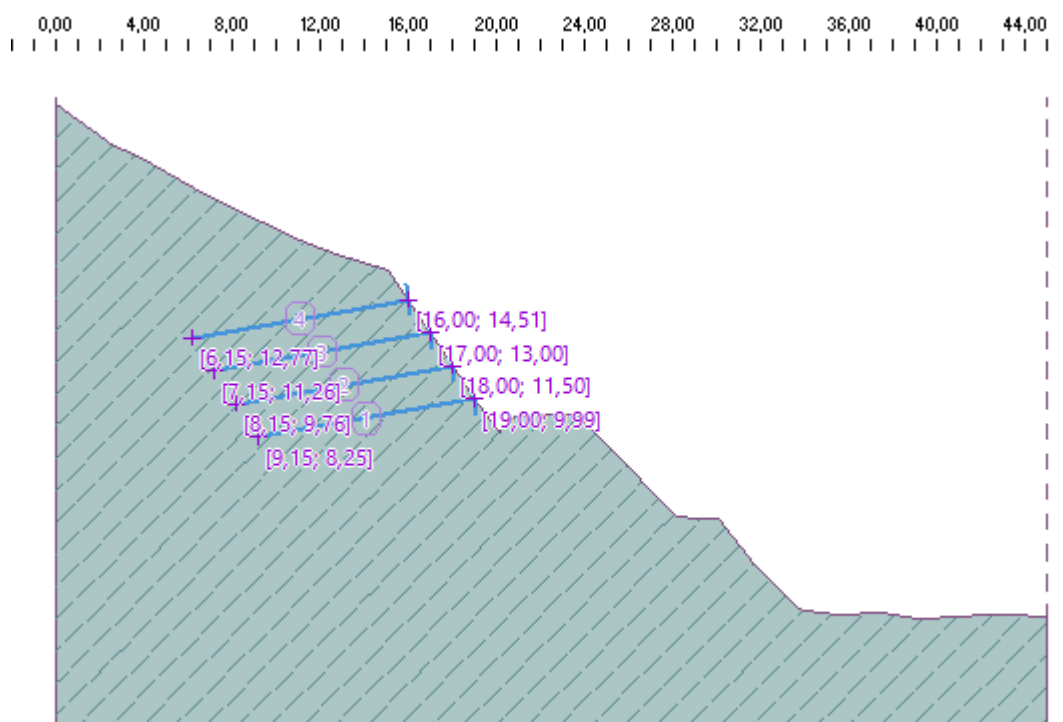
Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 3 - Especificações dos tirantes

Nº		1	2	3
Coordenadas	x (m)	19	17,5	16
	z (m)	10	12,3	14,5
Comprimento Livre l (m)		6	6	6
Comprimento Ancorado l _c (m)		4	4	4
Inclinação α (graus)		150	150	150
Espaçamento entre ancoragens b (m)		3	3	3
Força (kN)		600	600	600

Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 10 - Disposição dos grampos no talude



Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 4 – Especificações dos grampos

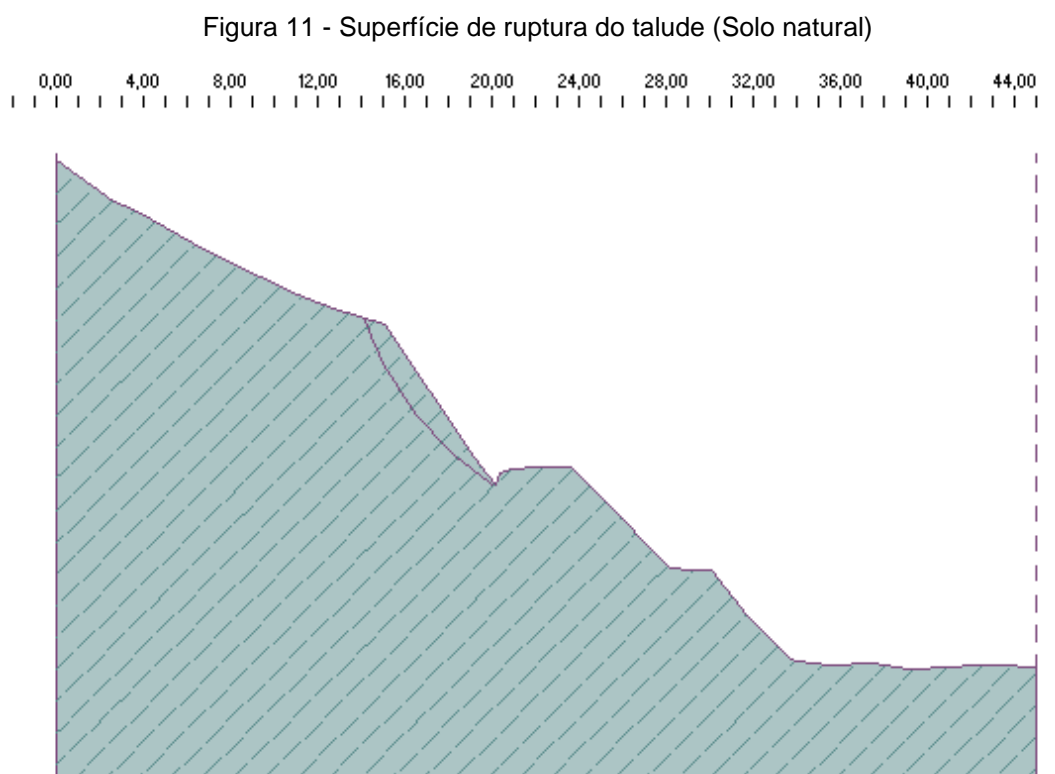
Nº		1	2	3	4
Ponto inicial	x (m)	19	18	17	16
	y (m)	9,99	11,5	13	14,51
Comprimento l (m)		10	10	10	10
Inclinação α (graus)		170	170	170	170
Espaçamento b (m)		1	1	1	1
Resistência a tensão (kN)		Rt = 176,51	Rt = 176,51	Rt = 176,51	Rt = 176,51
Resistência ao arrancamento (kN)		Tp = 55,43	Tp = 43,31	Tp = 31,20	Tp = 19,09
Resistência da cabeça do grampo (kN)		Rf = 70,69	Rf = 70,69	Rf = 70,69	Rf = 70,69

Fonte: Próprio autor, 2019

Importante salientar que esses parâmetros foram obtidos através de exemplos da literatura técnica, servindo apenas como base para estudar o comportamento dessas estruturas com a incorporação dos resíduos não sendo dimensionadas especificamente para este fim.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

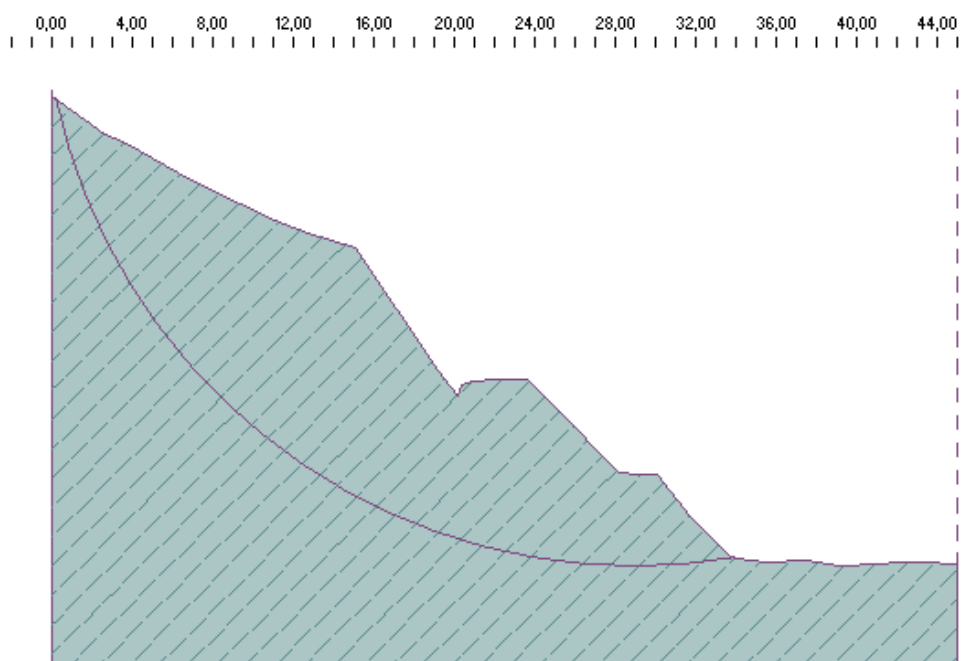
Ao ser realizada a análise, foi obtida a seguinte situação quanto a superfície de ruptura (Figura 11) mais desfavorável para a condição inicial, isto é, sem qualquer incorporação ou estrutura de contenção:



Fonte: Próprio autor, 2019

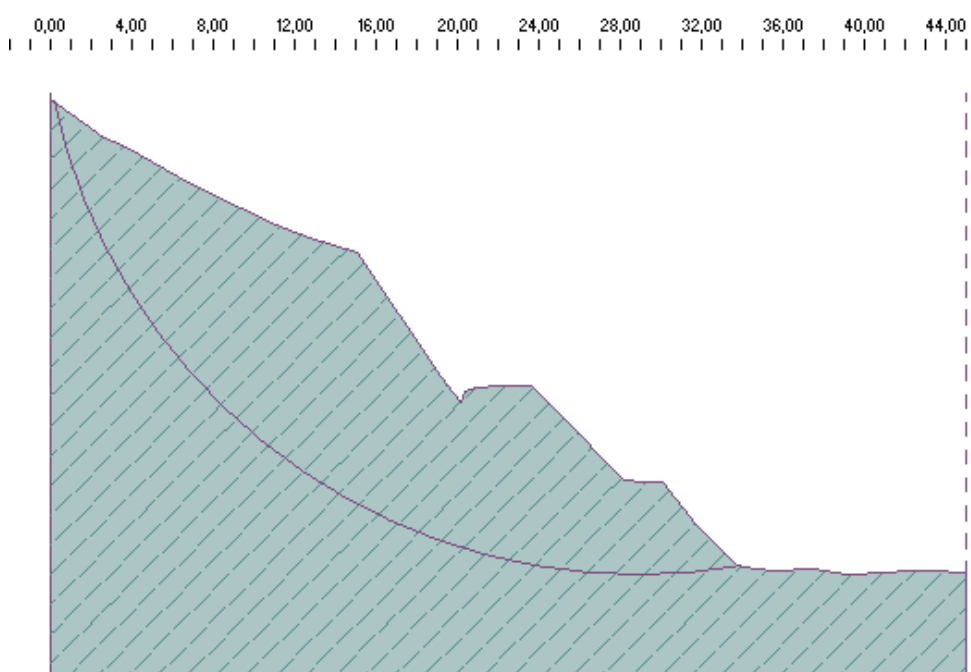
Ainda sem considerar qualquer estrutura de contenção, porém considerando a mesma geometria com a incorporação de resíduos, foram obtidas as seguintes superfícies de ruptura (Figuras 12 e 13).

Figura 12 - Superfície de ruptura (Solo + 5% CBC)



Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 13 - Superfície de deslizamento (Solo + 4% CCA)



Fonte: Próprio autor, 2019

Realizada a análise foram obtidos os seguintes coeficientes de segurança para o cenário onde não há qualquer estrutura de contenção (Tabelas 5 a 8).

Tabela 5 - Resultados detalhados (Solo natural)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 92,89kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 74,05kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 1118,44kNm/m
Momento resistente:	Mp = 891,56kNm/m
Fator de segurança	0,80 < 1,50
Estabilidade do talude NÃO VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 85,08kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 70,79kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 1243,82kNm/m
Momento resistente:	Mp = 1034,88kNm/m
Fator de segurança	0,83 < 1,50
Estabilidade do talude NÃO VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	0,83 < 1,50
Estabilidade do talude NÃO VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 6 - Resultados detalhados (Solo + 5% CCA)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1759,76kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 3736,11kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 49501,97kNm/m
Momento resistente:	Mp = 105096,64kNm/m
Fator de segurança	2,12 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1604,88 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 3548,06 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 47729,24 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 105519,29 kNm/m
Fator de segurança	2,21 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	2,23 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 7 - Resultados detalhados (Solo + 4% CBC)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1898,75kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 7286,65kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 53070,02kNm/m
Momento resistente:	Mp = 203661,79kNm/m
Fator de segurança	3,84 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1740,29 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 6951,40 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 51077,39kNm/m
Momento resistente:	Mp = 204023,66 kNm/m
Fator de segurança	3,99 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	4,02 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 8 – Resumo dos resultados da análise (Sem contenção)

Solo natural	
Método de Fellenius:	0,80
Método de Bishop:	0,83
Método de Spencer:	0,83
Solo + 5% CCA	
Método de Fellenius:	2,12
Método de Bishop:	2,21
Método de Spencer:	2,23
Solo + 4% CBC	
Método de Fellenius:	3,84
Método de Bishop:	3,99
Método de Spencer:	4,02

Fonte: Próprio autor, 2019

Como foi possível observar, a incorporação dos resíduos ampliou significativamente a capacidade que o talude tinha de suportar os esforços contidos dentro de si. O que confirma os resultados esperados através dos ensaios realizados

pelos autores dos mesmos, devido aos ganhos apresentados quanto a resistência ao cisalhamento, era esperado que isso se concretizasse em uma estrutura mais estável.

Considerando o emprego de tirantes conforme abordado na metodologia, os resultados foram esses que podem ser observados a seguir (Tabelas 9 a 12):

Tabela 9 - Resultados detalhados (Solo natural+ Tirantes)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1739,34kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 2629,76kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 53444,70kNm/m
Momento resistente:	Mp = 80786,15kNm/m
Fator de segurança	1,51 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1544,30kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 2600,21kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 52089,20kNm/m
Momento resistente:	Mp = 87705,22kNm/m
Fator de segurança	1,68 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	1,72 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 10 - Resultados detalhados (Solo + 5% de CCA + Tirantes)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1801,60kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 3828,96kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 49345,71 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 104875,10kNm/m
Fator de segurança	2,13 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1729,36kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 3857,93kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 48767,89kNm/m
Momento resistente:	Mp = 108793,68kNm/m
Fator de segurança	2,23 > 1,50

Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	2,25 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte Próprio autor, 2019

Tabela 11 - Resultados detalhados (Solo + 4% de CBC + Tirantes)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1923,72kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 7388,74kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 52902,23kNm/m
Momento resistente:	Mp = 203190,42kNm/m
Fator de segurança	3,84 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1799,35kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 7227,54kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 50723,76kNm/m
Momento resistente:	Mp = 203744,33kNm/m
Fator de segurança	4,02 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	4,07 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 12 – Resumo dos resultados da análise (Tirantes)

Solo natural	
Método de Fellenius:	1,51
Método de Bishop:	1,68
Método de Spencer:	1,72
Solo + 5% CCA	
Método de Fellenius:	2,13
Método de Bishop:	2,23
Método de Spencer:	2,25
Solo + 4% CBC	
Método de Fellenius:	3,84
Método de Bishop:	4,02
Método de Spencer:	4,07

Fonte: Próprio autor. 2019

Foi possível observar a oscilação dos esforços e, por conseguinte, dos fatores de segurança, ou seja, a incorporação de resíduos empregado junto da referida estrutura de contenção não apresenta nenhum ganho quanto a estabilidade.

Procedendo a análise da estabilidade do talude empregando os grampos, foi possível observar os resultados apresentados a seguir (Tabelas 12 a 16):

Tabela 13 - Resultados detalhados (Solo natural + grampos)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1594,83 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 2290,87 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 52087,06 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 74819,68 kNm/m
Fator de segurança	1,44 > 1,50
Estabilidade do talude NÃO VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1537,61 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 2445,30 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 52047,96 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 82773,49 kNm/m
Fator de segurança	1,59 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	1,58 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 14 - Resultados detalhados (Solo + 5% CCA + grampos)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1760,73 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 3738,10 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 49582,09 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 105264,81 kNm/m
Fator de segurança	2,12 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1598,86 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 3535,00 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 47757,89 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 105590,53 kNm/m

Fator de segurança	2,21 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	2,23 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 15 - Resultados detalhados (Solo + 4% CBC + grampos)

Verificação da estabilidade do talude (Fellenius/Petterson)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1888,85 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 7248,78 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 53190,01 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 204125,67 kNm/m
Fator de segurança	3,84 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Bishop)	
Soma de forças ativas:	Fa = 1736,77 kN/m
Soma de forças passivas:	Fp = 6937,43 kN/m
Momento de deslizamento:	Ma = 51130,59 kNm/m
Momento resistente:	Mp = 204238,06 kNm/m
Fator de segurança	3,99 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	
Verificação da estabilidade do talude (Spencer)	
Fator de segurança	4,02 > 1,50
Estabilidade do talude VERIFICA	

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 16 - Resumo dos resultados da análise (Solo grampeado)

Solo natural	
Método de Fellenius:	1,55
Método de Bishop:	1,82
Método de Spencer:	1,80
Solo + 5% CCA	
Método de Fellenius:	2,13
Método de Bishop:	2,24
Método de Spencer:	2,26
Solo + 4% CBC	
Método de Fellenius:	3,84
Método de Bishop:	4,04
Método de Spencer:	4,08

Fonte: Próprio autor, 2019

Assim como quando empregado junto de tirantes, os resíduos não apresentaram ganhos quanto a estabilidade ao serem utilizados junto da técnica solo grampeado. Importante dizer que não eram necessárias estruturas de contenção quando com emprego de resíduos, afinal, o talude já apresentava estabilidade atendendo ao fator de segurança mínimo de 1,5. Todavia, como o objeto desse trabalho é o estudo do comportamento dos resíduos sob a ótica da estabilidade dos taludes, as análises foram feitas de forma a observar como o material reage.

Com isso, observou-se que a solução que apresenta desempenho mais satisfatório considerando condições apresentadas é a mistura de solo natural com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, tendo expressivos ganhos quanto a estabilidade do talude em questão. Importante salientar também que a solução da mistura de solo com o referido teor de cinzas da casca do arroz também obteve ganhos quanto a estabilidade do maciço.

Apesar das amostras do solo não terem diferenças significativas quanto ao peso específico e o ângulo de atrito, a coesão varia significativamente, o que denota a importância desse parâmetro para a análise da estabilidade de taludes.

Ainda, é importante destacar a capacidade que os resíduos estudados possuem de melhorar tal característica do solo, o que confere ao solo ganhos expressivos na resistência ao cisalhamento, o que por sua vez, é vital para a estabilidade e uma encosta.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A finalidade do estudo realizado é a de verificar a viabilidade técnica da incorporação de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e cinzas da casca de arroz para obras envolvendo movimentações de terra e estabilidade de taludes.

Considerando o que foi apresentado ao longo desse trabalho, é possível afirmar que quanto ao aspecto da estabilidade de taludes, ambas as soluções estudadas atenderam as condições necessárias para garantir a estabilidade do talude em questão.

Ao realizar a análise sem considerar qualquer estrutura de contenção, observamos que com referência a amostra inicial, a solução de cinzas da casca de arroz agregadas ao solo apresentou aumento de 165% no fator de segurança. Já a mistura de solo com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar obteve ganhos na ordem de 380% com relação ao fator de segurança.

Contudo, observou-se que esses expressivos ganhos não são constatados quando na presença das estruturas de contenção empregadas para esse estudo, apresentando oscilações desprezíveis nos fatores de segurança. Com isso é possível afirmar que para os tipos de estruturas de contenção estudados e os resíduos agregados, a combinação de ambos não são vantajosos tanto economicamente quanto tecnicamente, apenas acrescentando complexidade e custos a uma eventual obra.

Ainda, esse comportamento apático se justifica devido a variação da superfície de ruptura crítica com relação ao solo natural, fazendo com que adotar uma mesma disposição dos tirantes e dos grampos para os cenários quando incorporados os resíduos não seja eficiente.

Importante dizer que para uma análise mais aprofundada sobre o emprego de resíduos incorporados ao solo para obras de terra, são necessários estudos específicos para dar mais embasamento a solução, como com relação a durabilidade do material, especialmente quando na presença de água.

Tendo em vista o que foi abordado ao longo do trabalho, outro ponto a se destacar é a possibilidade da utilização dos resíduos estudados para a construção de aterros rodoviários. Considerando a eventual dificuldade de encontrar jazidas de solos com necessária capacidade de suporte próximas ao empreendimento, e o impacto ambiental proporcionado pela extração desses materiais, a incorporação desses resíduos permite a melhoria das características do solo natural, o que pode viabilizar a escolha do solo de uma jazida mais próxima, conseqüentemente levando a uma maior economia quanto ao transporte de materiais escavados.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Examinar as soluções adotadas quando na presença de água;
- Estudar o comportamento dos materiais com relação ao envelhecimento;
- Realizar a análise com outras estruturas de contenção, como por exemplo, muro de arrimo;
- Analisar as soluções empregadas como fundação para pavimentos rodoviários;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5629: Execução de tirantes ancorados no terreno.** 1996.

NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE. **NHI Couse No. 132085: Soil Nails Walls Reference Manual.** 2015.

ANHUEZA PLAZA, C.; RODRÍGUEZ CIFUENTES, L. **Análises comparativo de métodos de cálculo de estabilidade de taludes finitos aplicados a laderas naturales,** Chile, v.12, n.1, p.17-29, set/jan. 2012/2013.

ARAYA, Mariela Del Carmen Ocampo Araya. **Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade HSQI: Aplicação na Costa Rica.** 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2016.

BERNARDI, Mateus Picoli. **Cortina Atirantada: o caso da obra de um subsolo em Florianópolis.** 2015. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações.** 6ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Volume 2, 1987

FERNANDES, Michelyne de Oliveira; FILHO, Francisco Chagas da Silva. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Fellenius, Bishop e Jambu,** Fortaleza, n. 19, p 91-98, dez. 1998.

FERREIRA, João Luís Ferrás. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer.** 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade do Porto – U. PORTO, Portugal, 2012.

Foose, Gary & Benson, Craig & J. Bosscher, P. (1996). **Sand Reinforced with Shredded Waste Tires. Journal of Geotechnical Engineering.** 122. 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:9(760).

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **CRAIG MECÂNICA DOS SOLOS:** 2015. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2015.

LEOCÁDIO, Gislene Aparecida Santiago. **Reforço de solo laterítico com fibras de sisal de distribuição aleatória, tratadas superficialmente com EPS reciclado.** 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais – UFOP/CETEC/UEMG, Ouro Preto, 2005.

LOBATO, André Luis Silva. **Estudo do comportamento físico e mecânico do solo laterítico de Brasília com adição de cinzas do bagaço da cana de açúcar.** 2018. Monografia – Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília, 2018.

ORTIGÃO, J.A.R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3ª ed. Terratek, 2007.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil**. 1ª Ed. São Carlos: RiMa Editora, 2009.

SANTOS, Nalva Luâny Ferreira. **Melhoramento de Solo com Utilização de Cinza de Casca de Arroz**. 2018. Monografia – Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília, 2018.

SILVA, João Paulo Moreira da. **Os métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Talude**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade do Porto – U. PORTO, Portugal, 2011.

SILVA, Tiago Proto da. **Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaisse**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

SPECHT, Luicano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2000.

VENDRUSCOLO, Marcio Antonio. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2000.